



Menentukan Proporsi Campuran Mortar yang Tepat dengan Pemanfaatan Limbah *Fly Ash* dan *Bottom Ash* Ditinjau dari Kuat Tekan

Y. A. Saputro^{1*}, D. Rochmanto², W. S. Darmoko³, Muhrodi⁴, K. Umam⁵

^{1*,2,3,4,5}Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Nahdlatul Ulama
Jepara

Email : ^{1*}yayan@unisnu.ac.id, ²drochmanto@unisnu.ac.id, ³wahyu@unisnu.ac.id,

⁴muhrodi@unisnu.ac.id, ⁵umamtsipil@unisnu.ac.id

ARTICLE INFO

Article history :

Artikel masuk : 09 – 11 – 2022

Artikel revisi : 06 – 12 – 2022

Artikel diterima : 22 – 12 – 2022

Keywords :

Bottom Ash, Compressive Strength, Fly Ash, Mortar, Oxidation Concentration.

Style IEEE dalam mensitasi artikel ini:

Y. A. Saputro, D. Rochmanto, W. S. Darmoko, Muhrodi, and K. Umam, "Menentukan Proporsi Campuran Mortar yang Tepat dengan Pemanfaatan Limbah Fly Ash dan Bottom Ash Ditinjau dari Kuat Tekan," *Jurmateks*, vol. 5, no.2, pp 222-234, 2022, doi: <http://dx.doi.org/10.30737/jurmateks.v5i2.3635>

ABSTRACT

The increase in the amount of fly ash and bottom ash waste every year requires proper management and utilization. In the manufacture of concrete, the use of fly ash and bottom ash can be used as a substitute material. However, it has not been utilized in making species in construction. This is because the exact proportion has not been obtained. The purpose of this study was to determine the correct proportions in the mortar with a mixture of fly ash and bottom ash. The research was carried out using experimental methods in the laboratory with cube-shaped specimens (5 x 5 x 5 cm) with 2 kinds of ratios between binder and fine aggregate, namely 1:2 and 1:4, each having a different percentage of sand and bottom ash, starting from from 20% to 80%. While the fly ash used is 10%. Tests carried out included material tests (Metal Oxidation Concentration Test and Sieve Analysis), and compressive strength tests (14 and 28 days). The results showed that the highest mortar compressive strength was at a ratio of 1:2 with fly ash as a cement mixture of 10% and bottom ash as a sand mixture of 20% with a compressive strength value of 16.8 MPa at the age of the specimen 28 days. The compressive strength value is in accordance with the provisions of SNI 03-6825-2002. The results of this study can be used by the community in making plaster work and can reduce the amount of waste that exists today.

1. Pendahuluan

Meningkatnya jumlah limbah *fly ash* dan *bottom ash* pada PLTU Tanjung Jati B Jepara menjadi tantangan tersendiri dalam hal pengelolaan dan pemanfaatan limbah yang dapat bernilai ekonomis. Hal ini dilakukan sebagai upaya dalam mengurangi limbah yang ada, dikarenakan sudah terjadi penumpukan di landfill. Penumpukan landfill ini menyebabkan terjadinya *over capacity* sehingga diperlukan pembukaan lahan baru. *Fly ash* dan *bottom ash* adalah limbah dari hasil pembakaran batu bara pada proses produksi penghasil listrik di PLTU.

Fly ash berupa abu terbang, sedangkan *bottom ash* berupa remah remah yang bentuknya seperti pasir namun memiliki berat yang lebih ringan. Secara umum *fly ash* yang dibentuk dari pembakaran batu bara digolongkan menjadi 2 tipe yaitu tipe F dan tipe C. Hal ini dibedakan berdasarkan perbedaan kandungan kimianya. Limbah *fly ash* dan *bottom ash* digolongkan kedalam limbah non B3 sesuai dengan Peraturan Pemerintah. *Fly ash* memiliki kandungan oksida-oksida silika (SiO_2), besi (Fe_2O_3), aluminium (Al_2O_3), dan kalsium (CaO), serta sodium, potasium, sulfur, dan titanium. Hal ini menjelaskan bahwa *fly ash* dapat dimanfaatkan sebagai substitusi semen dalam pada proses pembuatan beton.

Pemanfaatan *fly ash* dan *bottom ash* pernah diaplikasikan pada beton structural dan menunjukkan hasil kuat tekan 36,6 MPa [1]. Selain itu kajian penggunaan *bottom ash* dalam mortar tanpa adanya penambahan *fly ash* menunjukkan bahwa terjadi penurunan mutu jika semakin banyak jumlah *bottom ash* yang digunakan [2][3][4], *bottom ash* juga dipakai dalam proporsi pembuatan bata semen [5][6][7].

Beberapa penelitian menyimpulkan bahwa proporsi penggunaan *fly ash* maupun *bottom ash* mempengaruhi mutu. Kuat tekan merupakan tolak ukur dalam pengaplikasian *fly ash* dan *bottom ash* pada mortar maupun beton. Penelitian sebelumnya menyatakan bahwa penambahan *fly ash* mempunyai batasan optimum antara 20-30 %, dimana ketika dilakukan penambahan lebih dari 30% maka akan terjadi pelemahan/penurunan kuat tekan [8].

Banyak penelitian yang telah mengulas terkait pemanfaatan material *fly ash* untuk bahan pengganti semen dan *bottom ash* sebagai pengganti pasir. Namun saat ini limbah tersebut belum termanfaatkan secara menyeluruh khususnya dalam pembuatan spesi pada konstruksi. Hal ini dikarenakan belum diperoleh proporsi secara tepat dalam penggunaan *fly ash* dan *bottom ash* [9]. Disisi lain, hal ini sangat dibutuhkan untuk mengurangi jumlah limbah dalam suatu daerah terutama di PLTU Tanjung Jati B Jepara. Sehingga perlu dilakukan penelitian terkait pemanfaatan *fly ash* dan *bottom ash* beserta proporsi yang tepat serta menghasilkan kuat tekan optimal.

Tujuan penelitian ini untuk mencari kuat tekan tertinggi dari beberapa variasi mortar campuran *fly ash* dan *bottom ash*. Berdasarkan hal tersebut akan didapatkan proporsi campuran yang tepat dengan nilai kuat tekan tertinggi serta sesuai dengan standarisasi SNI 03-6825-2002. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan masyarakat dalam memanfaatkan *fly ash* dan *bottom ash* dalam campuran mortar serta mampu mengurangi jumlah limbah yang ada saat ini.

2. Metodologi Penelitian

Metode eksperimental dilakukan di laboratorium Bahan Konstruksi Teknik Sipil Fakultas Sains dan Teknologi UNISNU Jepara. Metode pengumpulan data berbentuk kuantitatif yang diperoleh dari proses eksperimental sehingga muncul angka-angka dan dihitung secara numerik. Penelitian diawali dengan melakukan pengujian kandungan kimia yang ada di *fly ash* dan *bottom ash*. Kemudian dilanjut pengujian pasir menggunakan *sieve shaker* untuk mengetahui gradasi yang ada dalam pasir tersebut, hal ini dilakukan untuk mengetahui bahwa material layak digunakan atau tidak[10]. Setelah semua material telah memenuhi standar material, selanjutnya dilakukan pembuatan benda uji berbentuk kubus dengan mutu rencana 15 MPa dan memiliki ukuran 5 x 5 x 5 cm[11][12][13]. Selanjutnya dilakukan uji kuat tekan pada umur 14 dan 28 hari.

2.1. Bahan Penelitian

Bahan dasar mortar pada penelitian ini adalah semen tipe PCC, pasir dan *bottom ash* lolos saringan 9,5-0,15 mm[14][15] dan *fly ash* lolos saringan no. 20. Semen dan *fly ash* sebagai bahan pengikatnya serta pasir dan *bottom ash* sebagai agregat halus.

2.2. Metode Pengujian

1. Pengujian Material

Pengujian material penyusun dilakukan sebagai kontrol awal terhadap material apakah sudah memenuhi standar atau belum[16]. Adapun pemerikasanaan material penyusun terdiri dari :

a. Pengujian Konsentrasi Oksidasi Logam

Pengujian ini dilakukan dengan cara memeriksa semua kandungan kimia yang ada pada *fly ash* dan *bottom ash*. Setelah itu dilakukan analisis pada konsentrasi oksidasi logam, apakah memenuhi syarat atau tidak[17][18][19]. Adapun persyaratan teknis dalam memanfaatkan limbah untuk bahan konstruksi yakni konsentrasi total harus lebih dari 50%. Tujuan dari pengujian konsentrasi oksidasi logam ini adalah untuk memperoleh kandungan secara kimia pada *fly ash* dan *bottom ash*, hal ini karena akan berpengaruh pada *setting time* dan kekuatan.

b. Pengujian Analisis Saringan

Analisis saringan digunakan untuk mengetahui prosentase berat butiran yang lolos dari satu set saringan yang ditinjau berdasarkan ukuran butirannya[2][3].



Sumber: Dokumentasi Proses, 2022

Gambar 1. Gambar Pengujian Analisa Saringan (*sieve shaker*)

Analisis saringan ini dilakukan untuk mengetahui modulus kehalusan pasir dimana terdapat 3 macam tingkat kehalusan yaitu :

Table 1. Klasifikasi modulus kehalusan pasir

Klasifikasi pasir	Modulus Kehalusan
Halus	2,20-2,60
Sedang	2,60-2,90
Kasar	2,90-3,20

Sumber : SNI 03 – 1750 - 1990

Untuk mencari modulus kehalusan, dapat dihitung menggunakan rumus berikut ini.

$$\text{Modulus Kehalusan} = \frac{\text{Total Berat Kumulatif}}{100}$$

2. Pembuatan Sample

Pembuatan sample menggunakan cetakan kubus berukuran 5x5x5cm, hal ini berdasarkan SNI 03-6825-2002. Adapun mix desain yang digunakan adalah sebagai berikut.

Table 2. Mix Desain Mortar

No	Mix Desain	Keterangan
1	1 Pc : 10% FA : 2 (20% Ps : 80% BA)	Perbandingan antara pengikat dan agregat halus adalah 1:2 Pengikat = Semen + 10% Fly Ash Agregat Halus = Pasir + Bottom Ash (variasi persentase yang berbeda mulai dari 20% sampai 80%)
	1 Pc : 10% FA : 2 (40% Ps : 60% BA)	
	1 Pc : 10% FA : 2 (60% Ps : 40% BA)	
	1 Pc : 10% FA : 2 (80% Ps : 20% BA)	
2	1 Pc : 10% FA : 4 (20% Ps : 80% BA)	Perbandingan antara pengikat dan agregat halus adalah 1:4 Pengikat = Semen + 10% Fly Ash Agregat Halus = Pasir + Bottom Ash (variasi persentase yang berbeda mulai dari 20% sampai 80%)
	1 Pc : 10% FA : 4 (40% Ps : 60% BA)	
	1 Pc : 10% FA : 4 (60% Ps : 40% BA)	
	1 Pc : 10% FA : 4 (80% Ps : 20% BA)	

Sumber : Rencana Penelitian, 2022

Keterangan :

Pc = Portland Cement

FA = *Fly Ash*

Ps = Pasir

BA = *Bottom Ash*

Secara umum terdapat 2 mix desain yang diteliti yaitu yaitu perbandingan antara pengikat dan agregat halus sebesar 1:2 dan 1:4. Setelah mix desain ditentukan, langkah pertama dalam membuat sampel yaitu menimbang setiap material kemudian mencampur semua material dengan FAS (Faktor Air Semen) 0,5 sampai merata dan selanjutnya dimasukkan ke dalam cetakan. Setelah 24 jam dalam cetakan, sampel dikeluarkan dari cetakan dan ditunggu hingga pengujian kuat tekan pada umur 14 dan 28 hari.



Sumber: Dokumentasi Proses, 2022

Gambar 2. Gambar Benda Uji.

3. Pengujian Kuat Tekan Mortar

Pengujian ini dilaksanakan mengacu standar SNI menggunakan alat Compression Machine dengan ukuran benda uji 5x5x5 cm[7][5]. Sedangkan untuk rumus yang dipakai dalam menganalisis menggunakan rumus standar kuat tekan [20]. Tujuan dilakukannya uji ini adalah untuk mengetahui kuat tekan benda uji [21][22].

3. Hasil dan Diskusi

3.1 Pengujian Material

Hasil pengujian karakteristik material penyusun didapatkan hasil sebagai berikut :

1. Hasil Uji Konsentrasi Oksidasi Logam

Berdasarkan hasil analisa dari laboratorium diperoleh bahwa kandungan *fly ash* dan *bottom ash* yang dipakai dapat diidentifikasi konsentrasi oksidasi logam total ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$). Adapun konsentrasi total disajikan pada **Tabel 3**.

Tabel 3 Konsentrasi Oksidasi Logam Total

No	Tipe Limbah	Sumber	Konsentrasi Total
1	<i>Fly Ash</i>	TJB Unit 3&4	81.14%
2	<i>Bottom Ash</i>	TJB Unit 3&4	83.53%

Sumber : Analisis Data, 2022

Fly ash dan *bottom ash* telah memenuhi persyaratan teknis dalam memanfaatkan limbah untuk bahan konstruksi yakni mempunyai konsentrasi total > 50% [23][24][25].

2. Hasil Uji Analisa Saringan

Pengujian analisa saringan dilakukan menggunakan dua buah sampel sebagai pembandingan dan faktor kehilangan tidak lebih dari 1%. Hasil pengujian dipaparkan pada

Tabel 4.

Tabel 4 Hasil Uji Analisa Saringan Pasir

Diameter Saringan (mm)	Percobaan ke I (gram)	Percobaan ke II (gram)	Sisa Pada Setiap Saringan		Sisa Kumulatif Tiap Saringan (%)	Yang Lolos (%)
			Rata - rata gram	(%)		
19.1	-				0	100.00
12	-	12	12	1.20	1.20	98.80
9.520	5	14	9.5	0.95	2.15	97.85
4.750	21	35	28	2.80	4.94	95.06
2.360	44	60	52	5.19	10.13	89.87
1.180	119	138	128.5	12.83	22.97	77.03
0.600	221	216	218.5	21.82	44.78	55.22
0.250	311	307	309	30.85	75.64	24.36
0.075	249	190	219.5	21.92	97.55	2.45
0.000	26	23	24.5	2.45	100.00	0.00
Jumlah	996.00	995.00	1001.50	100.00	259.09	

Sumber : Analisis Data, 2022

Modulus kehalusan suatu butiran selain memiliki fungsi *grading* kehalusan, juga bermanfaat untuk memperoleh nilai perbandingan berat antara kerikil dan pasir. Mengacu pada **Tabel 1** tentang klasifikasi modulus kehalusan pasir, maka didapatkan bahwa pasir yang digunakan tergolong pasir halus atau FM (*Fineness Modulus*) dengan modulus kehalusan sebesar 2,59.

3.2 Pengujian Kuat Tekan

1. Hasil Pengujian Mix Desain 1

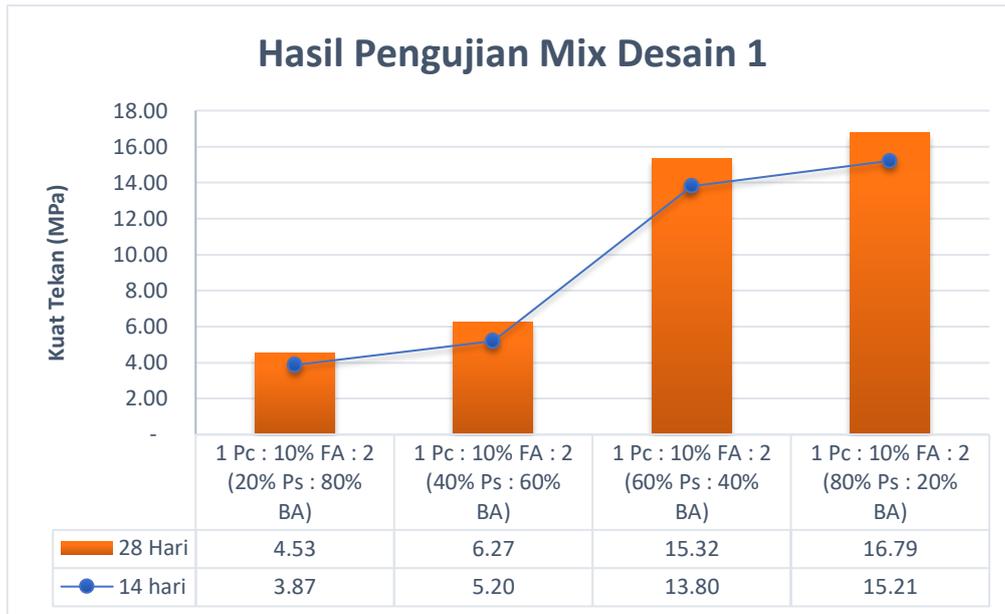
Pada Mix Desain 1 ini, perbandingan yang digunakan adalah 1 : 2. Hasil pengujian kuat tekan mix desain 1 dipaparkan pada **Tabel 5.**

Tabel 5 Hasil Pengujian Kuat Tekan Mortar Mix Desain 1

Pengikat Semen 1	FA	Agregat Halus		Umur (hari)	Sampel	Kuat Tekan (KN)	σ_m (Mpa)	Rata-Rata
		Pasir	BA					
90%	10%	20%	80%	14	A	10	4	3,87
					B	9	3,6	
					C	10	4	
				28	A	12	4,8	4,53
					B	11	4,4	
					C	11	4,4	
90%	10%	40%	60%	14	A	12	4,8	5,20
					B	14	5,6	
					C	13	5,2	
				28	A	16	6,4	6,27
					B	15	6	
					C	16	6,4	
90%	10%	60%	40%	14	A	31,3	12,5	13,80
					B	40,2	16,1	
					C	32	12,8	
				28	A	35,6	14,2	15,30
					B	38,8	15,5	
					C	40,5	16,2	
90%	10%	80%	20%	14	A	36,9	14,8	15,23
					B	31,4	12,6	
					C	45,8	18,3	
				28	A	39,7	15,9	16,80
					B	43	17,2	
					C	43,2	17,3	

Sumber : Analisis Data, 2022

Berdasarkan pengujian kuat tekan mortar pada mix desain 1 didapatkan hasil bahwa nilai kuat tekan pada semua variasi antara benda uji berumur 28 hari lebih besar dari benda uji umu 14 hari. Hal ini sebanding dengan penelitian lainnya [26][25][24][23][25]. Secara spesifik peningkatan dan penurunan hasil dapat dilihat pada grafik berikut:



Sumber: Analisis Data, 2022

Gambar 3. Grafik hubungan kuat tekan, umur, dan mix desain.

Dari grafik tersebut menunjukkan bahwa penambahan persentase *bottom ash* pada setiap campuran dapat mengakibatkan penurunan kuat tekan mulai dari yang paling rendah adalah penambahan 80%, 60%, 40%, dan 20%. Selain itu, dari mix desain 1 ini didapatkan kuat tekan mortar tertinggi pada campuran 20% *bottom ash* dan 80% pasir dengan umur benda uji 28 hari dengan didapatkan nilai kuat tekan 16,80 MPa.

2. Hasil Pengujian Mix Desain 2

Mix desain 2 ini menggunakan proporsi campuran dengan meningkatkan prosentase penggunaan agregat halus yang semula sebesar 1:2 pada mix desain 1 menjadi 1:4. Berikut hasil kuat tekan mortar mix desain 2 :

Tabel 6 Hasil Pengujian Kuat Tekan Mortar Mix Desain 2

Pengikat Semen 1	FA	Agregat Halus		Umur (hari)	Sampel	Kuat Tekan (KN)	σ_m (Mpa)	Rata-Rata
		Pasir 4	BA					
90%	10%	20%	80%	14	A	8	3,2	3,70
					B	9,7	3,9	
					C	9,9	4	
				28	A	13	5,2	5,20
					B	12	4,8	
					C	14	5,6	
90%	10%	40%	60%	14	A	10,4	4,2	4,00
					B	9,4	3,8	
					C	10	4	
				28	A	15	6	6,27
					B	16	6,4	
					C	16	6,4	
90%	10%	60%	40%	14	A	15,8	6,3	5,93
					B	13,9	5,6	
					C	14,8	5,9	
				28	A	17	6,8	6,93
					B	16,5	6,6	
					C	18,5	7,4	
90%	10%	80%	20%	14	A	16	6,4	6,43
					B	16	6,4	
					C	16,2	6,5	
				28	A	19,5	7,8	7,60
					B	18	7,2	
					C	19,5	7,8	

Sumber : Analisis Data, 2022

Berdasarkan pengujian kuat tekan mortar pada mix desain 2 yang dilakukan pada benda uji berumur 14 hari dan 28 hari didapatkan hasil terjadi peningkatan kuat tekan dari umur benda uji 14 hari ke 28 hari seperti pada mortar lainnya[21][22]. Dari **Tabel 6** tersebut menunjukkan bahwa semakin besar persentase penambahan pasir terhadap *bottom ash*, maka semakin meningkatkan nilai kuat tekannya. Hasil ini berbanding terbalik dengan

Menentukan Proporsi Campuran Mortar yang Tepat dengan Pemanfaatan Limbah Fly Ash dan Bottom Ash Ditinjau dari Kuat Tekan

jumlah penambahan *bottom ash*, semakin besar penambahan *bottom ash* mengakibatkan turunnya kuat tekan. Nilai kuat tekan tertinggi pada mix desain 2 adalah pada campuran 80% pasir dan 20% *bottom ash* pada umur 28 hari sebesar 7,60 MPa.

3. Perbandingan Mix Desain 1 dan 2

Sesuai dengan SNI 03-6825-2002 mutu mortar plesteran harus memiliki nilai 10 MPa atau setara mutu \pm K-100. Dikarenakan nilai kuat tekan mortar tertinggi pada mix desain 2 didapatkan nilai sebesar 7,60 MPa, maka mix desain tersebut tidak dapat digunakan dikarenakan kurang dari 10 MPa sehingga tidak memenuhi ketentuan yang telah ditetapkan. Sedangkan di sisi lain, mix desain 1 memenuhi standar kualitas mortar dan memiliki kesamaan trend peningkatan pada aspek umur benda uji. Semakin lama umur uji, maka semakin tinggi kuat tekan, hal ini relevan dengan penelitian-penelitian sebelumnya terkait perilaku beton semen. Sehingga didapatkan kuat tekan mortar tertinggi pada campuran 1:2 dengan pengikat (90% semen dan 10% *fly ash*) dan agregat halus (80% pasir dan 20% *bottom ash*).

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian didapatkan bahwa proporsi campuran mortar dengan memanfaatkan *fly ash* dan *bottom ash* yang tepat pada perbandingan antara pengikat dan agregat halus sebesar 1:2 dengan *fly ash* sebagai campuran semen sebesar 10% dan *bottom ash* sebagai campuran pasir sebesar 20%. Campuran tersebut mempunyai nilai kuat tekan sebesar 16,8 MPa pada umur benda uji 28 hari. Nilai kuat tekan tersebut sudah sesuai dengan ketentuan SNI 03-6825-2002 dimana mutu mortar plesteran harus memiliki nilai lebih dari 10 MPa. Hasil penelitian ini dapat digunakan masyarakat dalam membuat pekerjaan plesteran menggunakan bahan limbah *fly ash* dan *bottom ash*, sehingga dapat mengurangi jumlah limbah yang ada saat ini.

5. Ucapan Terima Kasih

Peneliti menyampaikan terima kasih pada LPPM UNISNU Jepara yang telah memberikan biaya penelitian berskema kolaborasi dengan mahasiswa tahun 2022. Dan juga peneliti memberikan ucapan terima kasih pada seluruh tim yang membantu terselenggaranya penelitian ini dengan baik.

Daftar Pustaka

- [1] K. E. Ghozali, A. Yonathan, A. Antoni, and D. Hardjito, "Penelitian Awal Pemanfaatan Fly Ash dan Bottom Ash PLTU Suralaya Dalam Pembuatan Beton Di Lingkungan Pantai," *J. Dimens. Pratama Tek. Sipil*, vol. 7, no. 2, pp. 177–184, 2018.
- [2] M. Qomaruddin, Y. A. Saputro, and S. Sudarno, "Kajian Penggunaan Bottom Ash sebagai Mortar Beton," *Pros. SNST ke-9 Univ. Wahid Hasyim Semarang*, pp. 34–39, 2018.
- [3] M. A. Sultan and R. Sakti, "Subtitusi Partitisi Agregat Halus Dengan Bottom Ash Pada Pembuatan Bata Semen," *Rekayasa Sipil*, vol. 13, no. 1, pp. 64–69, 2019, doi: 10.21776/ub.rekayasasipil.2019.013.01.9.
- [4] N. Ngudiyono, N. N. Kencanawati, and R. Prakarsa, "Pemanfaatan Fly Ash sebagai Bahan Subtitusi Parsial Semen pada Beton Memadat Sendiri," *J. Teknol. Lingkung.*, vol. 23, no. 1, pp. 055–061, 2022, doi: 10.29122/jtl.v23i1.5130.
- [5] Kusdiyono, Supriyadi, and H. L. Wahyono, "Pengaruh Penambahan Fly Ash dan Bottom Ash pada Pembuatan Beton Mutu F'c 20 Mpa dalam Upaya Pemanfaatan Limbah Industri," *Wahana Tek. SIPIL*, vol. 22, no. 1, pp. 40–49, 2017, doi: <http://dx.doi.org/10.32497/wahanats.v22i1.899>.
- [6] R. A. Wijaya, S. Wijayanti, and Y. Astuti, "Fly Ash Limbah Pembakaran Batubara sebagai Zat Mineral Tambahan (Additive) untuk Perbaikan Kualitas dan Kuat Tekan Semen," *Media Komun. Tek. Sipil*, vol. 27, no. 1, pp. 127–134, 2021.
- [7] M. Qomaruddin, A. Ariyanto, Y. A. Saputro, and S. Sudarno, "Analisa Kuat Tekan Mortar Beton Fly Ash Dari Industri Pltu Tanjung Jati Jepara Dengan Menggunakan Pasir Sungai Tempur Kabupaten Jepara," *Rev. Civ. Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 35–40, Mar. 2018, doi: 10.31002/rice.v2i1.678.
- [8] A. Susilowati and T. Oktaviana, "Pengaruh Variasi Bottom Ash terhadap Sifat Fisik dan Sifat Mekanik pada Mortar Semen," *RekaRacana J. Tek. Sipil*, vol. 7, no. 3, p. 139, 2021, doi: 10.26760/rekaracana.v7i3.139.
- [9] R. Yanuari *et al.*, "Studi Parametrik Mortar Geopolimer Hybrid Abu Sawit (Palm Oil Fuel Ash / Pofa)," *Rekayasa Sipil*, vol. 14, no. 2, pp. 83–90, 2020, doi: 10.21776/ub.rekayasasipil.2020.014.02.1.
- [10] H. Wu, Y. Jia, Z. Yuan, Z. Li, T. Sun, and J. Zhang, "Study on the Mechanical Properties, Wear Resistance and Microstructure of Hybrid Fiber-Reinforced Mortar Containing High Volume of Industrial Solid Waste Mineral Admixture," *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 11, 2022, doi: 10.3390/ma15113964.

- [11] M. Saukani and S. Arief, "Karakteristik Termal Mortar Geopolimer Berbasis Abu Layang dan Kaolin Alam," *Jurnal Fisika Flux*, vol. 15, no. 2, pp. 139–142, 2019, doi: 10.20527/flux.v15i2.5534.
- [12] J. Gulicovski, N. Risti, and S. Mili, "Waste slag from heating plants as a partial replacement for cement in mortar and concrete production. Part i—physical–chemical and physical–mechanical characterization of slag," pp. 1–15, 2020, doi: 10.3390/min10110992.
- [13] M. Qomaruddin, K. Umam, I. Istianah, Y. Adi Saputro, and P. Purwanto, "Pengaruh Bahan Kalsium Oksida pada Waktu Pengikatan Pasta Beton Geopolimer dan Konvensional," *Eksakta J. Sci. Data Anal.*, vol. 19, pp. 182–192, 2019, doi: 10.20885/eksakta.vol19.iss2.art8.
- [14] X. Ding, T. Ma, L. Gu, and Y. Zhang, "Materials & Design Investigation of surface micro-crack growth behavior of asphalt mortar based on the designed innovative mesoscopic test," *Mater. Des.*, vol. 185, p. 108238, 2020, doi: 10.1016/j.matdes.2019.108238.
- [15] J. Li, H. Zhou, W. Chen, and Z. Chen, "Shear properties of a new type recycled aggregate concrete interlocking hollow block masonry with axial load," pp. 1–15, 2021, doi: 10.1177/13694332211012568.
- [16] G. Vu, T. Iskhakov, J. J. Timothy, C. Schulte-Schrepping, R. Breitenbücher, and G. Meschke, "Cementitious composites with high compaction potential: Modeling and calibration," *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 21, pp. 1–17, 2020, doi: 10.3390/ma13214989.
- [17] Wahyuni E. T., Supraba D, Raharjo S, and Siswanta D, "Kajian Metode foto-Fenton untuk Penurunan Konsentrasi Ion Logam Berat Pb(II) dan Cu(II) dalam Larutan Secara Simultan dan Sinergi," *J. Kim. Sains dan Apl.*, vol. 22, no. 5, pp. 192–199, 2019, doi: 10.14710/jksa.22.5.192-199.
- [18] M. Wiyono and W. Wahyudi, "Analisis Unsur dalam Fly Ash dari Industri PLTU Batubara dengan Metode Analisis Aktivasi Neutron," *J. Teknol. Lingkung.*, vol. 19, no. 2, p. 221, 2018, doi: 10.29122/jtl.v19i2.2778.
- [19] R. Damayanti, "Abu batubara dan pemanfaatannya: Tinjauan teknis karakteristik secara kimia dan toksikologinya," *J. Teknol. Miner. dan Batubara*, vol. 14, no. 3, pp. 213–231, 2018, doi: 10.30556/jtmb.vol14.no3.2018.966.

- [20] D. N. Wahono, Z. Arifin, Y. C. S. Poernomo, Z. B. Mahardana, and A. Yamin, "Kuat Tekan dan Penyerapan Batako Menggunakan Serat Pelepah Kelapa," *J. Manaj. Teknol. Tek. Sipil*, vol. 4, no. 2, p. 86, 2021, doi: 10.30737/jurmateks.v4i2.2016.
- [21] M. Felix Wijaya, M. Olivia, and E. Saputra, "Kuat Tekan Mortar Geopolimer Abu Terbang Hybrid menggunakan Semen Portland," *J. Tek.*, vol. 13, no. 1, pp. 60–68, 2019, doi: 10.31849/teknik.v13i1.2914.
- [22] E. Riyanto, E. Widyananto, and R. R. Renaldy, "Analisis Kuat Tekan Mortar Geopolimer Berbahan Silica Fume dan Kapur Tohor," *INERSIA INformasi dan Ekspose Has. Ris. Tek. Sipil dan Arsit.*, vol. 17, no. 1, pp. 19–26, 2021, doi: 10.21831/inersia.v17i1.35901.
- [23] A. J. Khan *et al.*, "Axial compressive behavior of reinforced concrete (Rc) columns incorporating multi-walled carbon nanotubes and marble powder," *Crystals*, vol. 11, no. 3, pp. 1–16, 2021, doi: 10.3390/cryst11030247.
- [24] H. Zhang, J. Liu, B. Wu, and Z. Zhang, "Axial Compressive Behavior of Geopolymer Recycled," *Materials (Basel)*, vol. 13, no.3, pp. 1–16, 2020, doi: 10.3390/ma13030533.
- [25] A. Salinas and D. Feys, "Estimation of Lubrication Layer Thickness and Composition through Reverse Engineering of Interface Rheometry Tests," *Materials*, vol. 13, no. 8, p. 1799, 2020, doi: 10.3390/MA13081799.